



2022
Lleida

27 · 1
junio · juny
juliol · juliol

Cataluña
Catalunya

8º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

La **Ciencia forestal** y su contribución a
los **Objetivos de Desarrollo Sostenible**

8CFE

Edita: Sociedad Española de Ciencias Forestales

Cataluña | Catalunya · 27 junio | juny - 1 julio | juliol 2022

ISBN 978-84-941695-6-4

© Sociedad Española de Ciencias Forestales



Organiza

Impacto del cambio climático en la producción de setas en Cataluña

ALBERT MORERA^{1,2}, JUAN MARTÍNEZ DE ARAGÓN³, JOSÉ ANTONIO BONET^{1,2}, SERGIO DE-MIGUEL^{1,2}

¹ Departamento de Producción Vegetal y Ciencia Forestal, Universidad de Lérida, Av. Alcalde Rovira Roure 191, E-25198 Lleida, España

² Unidad mixta de investigación CTFC – AGROTECNIO – CERCA, Av. Alcalde Rovira Roure 191, E-25198 Lleida, España.

³ Centro de Ciencia y Tecnología Forestal de Cataluña (CTFC), Ctra de Sant Llorenç de Morunys, km 2, 25280 Solsona, Lleida.

Resumen

El cambio climático es una realidad que está afectando a los ecosistemas naturales desde hace décadas y que se prevé que lo siga haciendo durante el próximo siglo. La fructificación de los hongos, debido a que está estrechamente relacionada con la meteorología anual, podría verse afectada por estos cambios en los ecosistemas. El importante papel que juegan los hongos en los ecosistemas forestales pone de manifiesto la necesidad de comprender cómo el cambio climático está modificando sus patrones de producción. En este estudio utilizamos modelos de aprendizaje automático para estimar cómo evolucionará la productividad total de setas en los bosques mediterráneos desde el año 2020 y hasta el 2100 en función de distintos modelos y escenarios de cambio climático. Nuestros resultados sugieren que la producción de setas no se verá afectada de igual manera en todo el territorio, si no que dependerá de la combinación de factores meteorológicos específicos de cada zona. De manera general, los escenarios de cambio climático que estiman un mayor aumento en la temperatura repercutirán en una disminución de la producción de setas más generalizada, mientras que en escenarios más conservadores podría comportar un cambio casi inexistente en el conjunto del territorio.

Palabras clave

Hongos; Setas; Cambio climático; Dinámicas espacio-temporales; Biogeografía; Predicción.

1. Introducción

Entender como el cambio climático afectará a la productividad de los hongos es de gran importancia debido a que estos son los responsables de muchos de los procesos que se dan en los ecosistemas forestales. Además, las setas representan un recurso de gran valor en muchas sociedades, especialmente en la cuenca mediterránea (Boa, 2004; Palahí et al., 2009). En los bosques mediterráneos, donde la productividad de hongos está estrechamente ligada a las condiciones climáticas, predecir el impacto del cambio climático sobre la productividad de hongos (Alday et al., 2017; Karavani et al., 2018; Morera et al., 2021) es de gran importancia a la hora de anticipar el impacto sobre el funcionamiento de los ecosistemas forestales en términos de mitigación y adaptación al cambio climático (Cheeke et al., 2016; Terre et al., 2016).

No son muchos los trabajos que hayan estudiado los impactos del cambio climático sobre la productividad de hongos a nivel de paisaje y en un amplio rango bioclimático. Hasta ahora solo se ha conseguido estimar dicho impacto de manera local o con una baja resolución espacial o temporal, con resultados opuestos y conclusiones limitadas por el sesgo del estudio geográfico (Ágreda et al., 2015; Karavani et al., 2018; Morán-Ordóñez et al., 2020; Roces-Díaz et al., 2021). Para lograr este objetivo, es muy importante disponer de extensas series de datos que contemplen un amplio rango espacial y temporal, resultado de un muestreo e identificación taxonómica consistente a lo largo del tiempo. Además, debido a la estocasticidad que parece regir la productividad de hongos, es necesario el uso de herramientas y métodos que permitan tener en cuenta un gran número de predictores, las interacciones entre ellos y las dependencias no lineales de los datos. De acuerdo con esto, los modelos basados en algoritmos de aprendizaje automático (ML) parecen ser buenos candidatos para

estimar la productividad de hongos, en comparación con técnicas estadísticas más tradicionales (Morera et al., 2021).

En este estudio estimamos la productividad futura de hongos (2020 - 2100) en un amplio rango bioclimático representativo de la cuenca mediterránea. Para ello, utilizamos modelos de random forest (RF) y un total de más de 1.000 datos anuales de productividad de hongos para conseguir estimaciones espacialmente explícitas de gran resolución espacio-temporal, considerando datos proyectados bajo dos posibles escenarios de cambio climático, a saber, RCP 4.5 y RCP 8.5.

2. Materiales y métodos

2.1. Área de estudio y datos de modelización

Utilizamos datos de productividad de hongos de un total de más de 100 parcelas de muestreo permanentes muestreadas durante más de 20 años (1997-2019) de manera semanal entre el mes de junio y diciembre. Las parcelas se sitúan en un amplio rango bioclimático considerando el estadio subalpino, montano, supramediterráneo y mesomediterráneo (Figura 1). Más información sobre la metodología de muestreo puede encontrarse en Bonet et al. (2004) y Martínez de Aragón et al. (2007).

La información meteorológica de cada parcela se obtuvo a partir de la interpolación y corrección altitudinal, mediante el paquete de R “meteoland” (v0.8.1; De Cáceres et al., 2018), de las estaciones meteorológicas más cercanas del Servicio Meteorológico de Cataluña (SMC) y la Agencia Española de Meteorología (AEMET).

2.2. Modelización

La productividad de hongos se estimó de manera anual, por lo que agregamos los datos semanales muestreados. Para reducir el número de predictores del modelo y que a la vez pudieran representar de la manera más precisa los cambios meteorológicos durante el otoño, se agregaron los datos meteorológicos a escala mensual.

Para determinar los hiperparámetros óptimos de los modelos de RF que mejoraran las estimaciones de productividad de hongos en un amplio gradiente bioclimático, utilizamos una estrategia de remuestreo basada en un bloqueo ambiental. La selección de los predictores del modelo se hizo a partir del conocimiento experto y la literatura existente al respecto, junto con la importancia otorgada a cada predictor por el propio modelo y la correlación tanto entre predictores, como entre los potenciales predictores y la productividad de hongos muestreada.

Los hiperparámetros “mtry”, “min.node.size” y “num.trees” de cada modelo se ajustaron mediante una optimización bayesiana y centrada en la reducción del error de predicción en término de la raíz del error cuadrático medio (RMSE), tal y como se implementa en el paquete de R “mlr3mbo” (v0.0.0.9000; Richter et al., 2021).

Los modelos se evaluaron de acuerdo con la precisión de las estimaciones y la interpretación ecológica de los patrones encontrados en los datos. Para ello se utilizó una validación cruzada (CV) basada en un bloqueo ambiental (Roberts et al., 2017) y gráficos de dependencia parcial (PDP), respectivamente.

2.3. Evaluación del impacto del cambio climático

Para evaluar los cambios en la productividad anual de hongos utilizamos información meteorológica con una resolución de 1 km. Las proyecciones meteorológicas futuras se obtuvieron de la iniciativa EURO-CODEX (Kotlarski et al., 2014). La selección de las parejas de GCM-RCM (ver Tabla 1) se basó parcialmente en estudios desarrollados en lugares adyacentes a nuestra área de estudio (Fargeon et al., 2020). Comparamos dos contrastados escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero, a saber, RCP 4.5 y RCP 8.5 (IPCC, 2014). Se hizo una reducción de escala y una corrección de sesgo de las proyecciones meteorológicas hasta una resolución de 1 km utilizando datos históricos de estaciones meteorológicas cercadas. Tanto la reducción de escala como la corrección de sesgo se hizo mediante el paquete de R “meteoland” (v0.8.1; De Cáceres et al., 2018).

Las estimaciones de la productividad anual de hongos se hicieron a una resolución de 1 km sobre los pinares de Cataluña (en base al mapa de hábitats CRONE). Las estimaciones futuras se

calcularon por cada pareja de GCM-RCM y RCP para finalmente se agregados y obtener la media para cada RCP. Para cada pixel obtenido se estimó la significación estadística de las tendencias anuales y el valor de las mismas. Esto se hizo a partir del test de Mann-Kendall (utilizando el paquete de R “Kendall” (v2.2; McLeod, 2011)) y la aproximación de Theil-Sen (utilizando el paquete de R “mblm” (v0.12.1; Komsta, 2019)), respectivamente. Finalmente, para estimar los cambios anuales en la productividad de setas de manera general en el área de estudio, se hizo la media de todos los pixeles que describen en área de estudio por cada año y posteriormente se usó de nuevo el test de Mann-Kendall y la aproximación de Theil-Sen para estimar las tendencias futuras.

3. Resultados

Los modelos de RF explicaron un 42% de la varianza. El RMSE estimado a partir de una validación cruzada ambiental mostró un error de $133 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$.

3.1. Relación entre la productividad fúngica y las condiciones meteorológicas

Los modelos ajustados dieron mayor importancia a las variables de precipitación respecto a las de temperatura, con valores relativos de 70% y 30%, respectivamente. Los PDP mostraron que la precipitación de agosto y octubre tenían un comportamiento creciente continuo de la productividad de hongos respecto al gradiente de precipitaciones analizado. Por lo contrario, la precipitación de septiembre y noviembre se aproximaba más a una forma de escalón. La temperatura máxima de los meses de agosto, septiembre y octubre mostraron una relación negativa con la productividad de setas, mientras que para la temperatura máxima de noviembre fue ligeramente positiva (Figura 2).

3.2. Evaluación de los efectos previstos del cambio climático en la productividad de los hongos

Las proyecciones de cambio climático analizadas muestran diferencias entre distintos RCPs. Aun así, en ambos escenarios de cambio climático no se esperan cambios estadísticamente significativos en el global de la productividad de hongos en Cataluña. En RCP 4.5 vimos que la productividad de hongos únicamente disminuirá en las cotas más elevadas, en las zonas subalpinas y montañas de la cordillera pirenaica (con un valor medio de $-48 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$, en un rango de entre -1.10 y $-0.07 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$). Por otro lado, RCP 8.5 mostró una disminución de la productividad de hongos también en las regiones subalpinas y montañas de la cordillera pirenaica, pero con un valor mayor y abarcando una mayor extensión de territorio (una extensión en torno a 2.5 veces mayor y con un valor medio de $-0.78 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$, en un rango de entre -2.45 y $0.32 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$). Por lo contrario, no encontramos ninguna disminución de la productividad de hongos en las regiones supra-, meso- y termomediterránea. Sólo encontramos una disminución en la productividad de hongos total para algunos bosques supramediterráneos en la parte sur del área de estudio dominados por *P. nigra* y *P. sylvestris*. Sólo se predijeron incrementos estadísticamente significativos en la productividad total para algunas localizaciones costeras de bosques meso- y termomediterráneos de *P. halepensis* bajo el escenario RCP 8.5, pero fueron meramente marginales (Figura 3).

4. Discusión

Nuestro estudio mostró que el cambio climático afectará a la productividad de hongos de manera diferente a través del espacio y entre escenarios de cambio climático. Los cambios en la productividad de hongos que se darán bajo RCP 4.5 serán casi inexistentes, mostrando que reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero las siguientes décadas (IPCC, 2014) sería posible minimizar el impacto climático sobre este aspecto concreto. Por lo contrario, en escenarios más severos, como RCP 8.5, se espera que el impacto sea bastante mayor, reduciendo la productividad de hongos de manera considerable en algunas zonas. Resultados parecidos fueron mostrados para la riqueza y abundancia de hongos en los bosques boreales de Norteamérica (Steidinger et al., 2020) y en especies específicas en China (Guo et al., 2017).

Los resultados apuntan a que durante los meses de otoño (aquellos que determinan en mayor medida la productividad de hongos), la temperatura tenderá a aumentar durante los próximos años en ambos RCPs analizados. Por lo contrario, no se espera un aumento o disminución

estadísticamente significativa de la precipitación en estos meses. Además, las zonas con un mayor aumento de la temperatura coinciden con los mayores cambios en la producción de hongos (Morera et al., 2021). Esto sugiere que, de manera general, la temperatura será el mayor desencadenante de los cambios en la productividad de setas, aun sabiendo que evidentemente el cambio se debe a una combinación de distintos factores ambientales. Esto se apoya desde el punto de vista de la fenología de las especies a través del espacio debido a la variabilidad climática (Andrew et al., 2018). Estos cambios en la temperatura y la productividad de los hongos fueron menos marcados con la disminución de la altitud dentro de estas regiones bioclimáticas. Sin embargo, se predijo que algunas zonas de las regiones bioclimáticas distintas de los bosques subalpinos y montanos (es decir, los bosques de *P. sylvestris* y *P. nigra* en la región supramediterránea del sur del área de estudio) experimentarían una disminución de la productividad fúngica, pero no un mayor aumento de la temperatura en comparación con las zonas circundantes. Por el contrario, se predijo que estas áreas experimentarían un descenso significativo de las precipitaciones en octubre, lo que es coherente con el retraso de la fenología de fructificación en comparación con los bosques subalpinos y montanos (Karavani et al., 2018).

Estimamos que los mayores cambios en la productividad de hongos se darán en los bosques de *P. sylvestris* y *P. uncinata* de las regiones subalpinas y montanas. Esto coincide con las regiones de mayor productividad de setas (Morera et al., 2021). En estas zonas, donde los hongos viven cerca de su límite fisiológico, es normal esperar que se den los mayores cambios en la productividad (Diez et al., 2020). En nuestra zona de estudio, el mayor cambio en las zonas de mayor altitud se muestra en la forma de una relación exponencial negativa entre la productividad fúngica y la temperatura máxima media de agosto y octubre (ambas las variables más importantes relacionadas con la temperatura en nuestros modelos). Esta relación conduce a un descenso más pronunciado de la productividad en las zonas más frías para un mismo aumento de la temperatura.

Las diferencias encontradas en la productividad de hongos entre las distintas parejas de GCM-RCM ponen de manifiesto la necesidad de evaluar un conjunto de modelos alternativos para minimizar el potencial sesgo de predicción que puede surgir al confiar en un único modelo (Knutti et al., 2010). Esto toma gran importancia en áreas con una orografía compleja, donde las diferencias entre las proyecciones de los distintos RCMs puede ser mayor. La utilización de distintos RCMs permite reducir el sesgo de las predicciones sin aumentar la incertidumbre de las predicciones de los GCMs, ya que los sesgos de ambos modelos no son aditivos ni independientes (Knutti et al., 2010).

Los cambios encontrados en la productividad de hongos deben ser enmarcados en un contexto de cambio global (Guiot et al., 2016). Debido al papel importante que juegan los hongos en los ecosistemas naturales, los cambios en sus patrones de productividad podrían afectar a la diversidad y funcionamiento de los ecosistemas forestales (Gouveia et al., 2017; Santonja et al., 2017). Se ha visto que el cambio climático afectará a la distribución y diversidad de las simbiosis micorrícicas a escala global (Steidinger et al., 2020, 2019), haciendo que puedan verse alteradas las capacidades de los árboles y plantas para acceder a nutrientes limitantes (Batterman et al., 2013; Shah et al., 2016) o fijar carbono (Clemmensen et al., 2015; Averill et al., 2014). Por lo tanto, los ecosistemas naturales se podrían ver afectados a la hora de resistir el impacto climático (Cheeke et al., 2016; Terrer et al., 2016). Estos cambios en los ecosistemas naturales pueden, a su vez, afectar más a las comunidades fúngicas, creando un bucle que se retroalimenta y que aceleraría aún más los cambios en estos ecosistemas. Además, debido a que las setas son los cuerpos fructíferos de los hongos, cambios en los patrones biogeográficos de productividad podrían limitar la dispersión de estos organismos (Nordén, 2000).

Debido a la falta de estudios y proyecciones de otros potenciales impulsores de la productividad fúngica a nivel de paisaje (por ejemplo, migración de especies forestales o efectos antropológicos), en este estudio solo evaluamos los cambios en la productividad de hongos en función de las condiciones climáticas. Disponer de esta información supondría una mejora de la precisión de los cambios estimados en la productividad de los hongos y aumentar la comprensión de las dinámicas que se dan en los ecosistemas forestales.

5. Bibliografía

- ÁGRED A, T.; ÁGUEDA, B.; OLANO, J. M.; VICENTE-SERRANO, S. M.; & FERNÁNDEZ-TOIRÁN, M.; 2015. Increased evapotranspiration demand in a Mediterranean climate might cause a decline in fungal yields under global warming. *Global Change Biology*, 21(9), 3499–3510. doi:10.1111/gcb.12960
- ALDAY, J. G.; MARTÍNEZ DE ARAGÓN, J.; DE-MIGUEL, S.; & BONET, J. A.; 2017. Mushroom biomass and diversity are driven by different spatio-temporal scales along Mediterranean elevation gradients. *Scientific Reports*, 7(1). doi:10.1038/srep45824
- ANDREW, C.; HEEGAARD, E.; HØILAND, K.; SENN-IRLET, B.; KUYPER, T.W.; KRISAI-GREILHUBER, I.; KIRK, P.M.; HEILMANN-CLAUSEN, J.; GANGE, A.C.; EGLI, S.; BÄSSLER, C.; BÜNTGEN, U.; BODDY, L.; KAUSERUD, H.; 2018. Explaining European fungal fruiting phenology with climate variability. *Ecology*, 99 (6), pp. 1306–1315. doi:10.1002/ecy.2237
- AVERILL, C.; DIETZE, M. C.; BHATNAGAR, J. M.; 2018. Continental-scale nitrogen pollution is shifting forest mycorrhizal associations and soil carbon stocks, *Global Change Biology*, 24(10), pp. 4544–4553. doi: 10.1111/gcb.14368.
- BATTERMAN, S.; HEDIN, L.; VAN BREUGEL, M.; RANSIJN, J.; CRAVE, D.J.; HALL J.S.; 2013. Key role of symbiotic dinitrogen fixation in tropical forest secondary succession. *Nature* 502, 224–227 (2013). <https://doi.org/10.1038/nature12525>
- BOA, E.; 2004. Wild edible fungi: A global overview of their use and importance to people. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy, pp. 163.
- BONET, J.A.; FISCHER, C.R.; COLINAS, C.; 2004. The relationship between forest age and aspect on the production of sporocarps of ectomycorrhizal fungi in *Pinus sylvestris* forests of the Central Pyrenees. *Forest Ecol Manag* 203(1–3):157–175. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.07.063>
- CHEEKE, T. E.; PHILLIPS, R. P.; BRZOSTEK, E. R.; ROSLING, A.; BEVER, J. D.; & FRANSSON, P.; 2016. Dominant mycorrhizal association of trees alters carbon and nutrient cycling by selecting for microbial groups with distinct enzyme function. *New Phytologist*, 214(1), 432–442. doi:10.1111/nph.14343
- CLEMMENSEN, K.E.; FINLAY, R.D.; DAHLBERG, A.; STENLID, J.; WARDLE, D.A.; LINDAHL, B.D.; 2015. Carbon sequestration is related to mycorrhizal fungal community shifts during long-term succession in boreal forests. *New Phytol*, 205: 1525-1536. <https://doi.org/10.1111/nph.13208>
- DE CÁCERES, M.; MARTIN-STPAUL, N.; TURCO, M.; CABON, A.; & GRANDA, V.; 2018. Estimating daily meteorological data and downscaling climate models over landscapes. *Environmental Modelling & Software*, 108, 186–196. doi:10.1016/j.envsoft.2018.08.003 doi:10.1175/2009jcli3361.1
- DIEZ, J.; KAUSERUD, H.; ANDREW, C.; HEEGAARD, E.; KRISAI-GREILHUBER, I.; SENN-IRLET, B.; ... BÜNTGEN, U.; 2020. Altitudinal upwards shifts in fungal fruiting in the Alps. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 287(1919), 20192348. doi:10.1098/rspb.2019.2348
- FARGEON, H.; PIMONT, F.; MARTIN-STPAUL, N.; DE CACERES, M.; RUFFAULT, J.; BARBERO, R.; & DUPUY, J.-L.; 2020. Projections of fire danger under climate change over France: where do the greatest uncertainties lie? *Climatic Change*. doi:10.1007/s10584-019-02629-w
- GOUVEIA, C. M.; TRIGO, R. M.; BEGUERÍA, S.; & VICENTE-SERRANO, S. M.; 2017. Drought impacts on vegetation activity in the Mediterranean region: An assessment using remote sensing data and multi-

scale drought indicators. *Global and Planetary Change*, 151, 15–27. doi:10.1016/j.gloplacha.2016.06.011

GUIOT, J.; & CRAMER, W.; 2016. Climate change: The 2015 Paris Agreement thresholds and Mediterranean basin ecosystems. *Science*, 354(6311), 465–468. doi:10.1126/science.aah5015

GUO, Y.; LI, X.; ZHAO, Z.; WEI, H.; GAO, B.; & GU, W.; 2017. Prediction of the potential geographic distribution of the ectomycorrhizal mushroom *Tricholoma matsutake* under multiple climate change scenarios. *Scientific Reports*, 7(1). doi:10.1038/srep46221

IPCC (2014): *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.

KARAVANI, A.; DE CÁCERES, M.; MARTÍNEZ DE ARAGÓN, J.; BONET, J. A.; DE-MIGUEL, S.; 2018. Effect of climatic and soil moisture conditions on mushroom productivity and related ecosystem services in Mediterranean pine stands facing climate change. *Agric Forest Meteorol* 248:432–440. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.10.024>

KNUTTI, R.; FURRER, R.; TEBALDI, C.; CERMAK, J.; & MEEHL, G. A.; 2010. Challenges in Combining Projections from Multiple Climate Models. *Journal of Climate*, 23(10), 2739–2758. doi:10.1175/2009jcli3361.1

KOMSTA, L.; 2019. mblm: Median-Based Linear Models. R package version 0.12.1. <https://CRAN.R-project.org/package=mblm>

KOTLARSKI, S.; KEULER, K.; CHRISTENSEN, O. B.; COLETTE, A.; DÉQUÉ, M.; GOBIET, A.; GOERGEN, K.; JACOB, D.; LÜTHI, D.; VAN MEIJGAARD, E.; NIKULIN, G.; SCHÄR, C.; TEICHMANN, C.; VAUTARD, R.; WARRACH-SAGI, K.; WULFMEYER, V.; 2014. Regional climate modeling on European scales: a joint standard evaluation of the EURO-CORDEX RCM ensemble. *Geosci Model Dev* 7:1297–1333. doi: 10.5194/gmd-7-1297-2014

MARTÍNEZ DE ARAGÓN, J.; BONET, J. A.; FISCHER, C.R.; COLINAS, C.; 2007. Productivity of ectomycorrhizal and selected edible saprotrophic fungi in pine forests of the pre-Pyrenees mountains, Spain: predictive equations for forest management of mycological resources. *Forest Ecol Manag* 252(1–3):239–256. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.06.040>

MCLEOD, A. I.; 2011. Kendall: Kendall rank correlation and Mann-Kendall trend test. R package version 2.2. <https://CRAN.R-project.org/package=Kendall>

MORÁN-ORDÓÑEZ, A.; AMEZTEGUI, A.; DE CÁCERES, M.; DE-MIGUEL, S.; LEFÈVRE, F.; BROTONS, L.; COLL, L.; 2020. Future trade-offs and synergies among ecosystem services in Mediterranean forests under global change scenarios. *Ecosystem Services*, 45, 101174. doi:10.1016/j.ecoser.2020.101174

MORERA, A.; MARTÍNEZ DE ARAGÓN, J., BONET J. A.; DE-MIGUEL, S.; 2021. Performance of statistical and machine learning-based methods for predicting biogeographical patterns of fungal productivity in forest ecosystems, *Forest Ecosystems*, 8(1), p. 21. doi: 10.1186/s40663-021-00297-w.

NORDÉN B. 2000. Dispersal ecology and conservation of wood-decay fungi. PhD thesis, Göteborg Univ.; Gothenburg, Sweden.

- PALAHÍ, M.; PUKKALA, T.; BONET, J.A.; COLINAS, C.; FISCHER, C.R.; MARTÍNEZ DE ARAGÓN, J.R.; 2009. Effect of the inclusion of mushroom values on the optimal management of even-aged pine stands of Catalonia. *For. Sci.* 55 (6), 503–511. doi: 10.1093/forestscience/55.6.503
- RICHTER, J.; BECKER, M.; LANG, M.; BISCHL, B.; BINDER, M.; MOOSBAUER, J.; 2021. mlr3mbo: Flexible Bayesian Optimization in R. <https://mlr3mbo.mlr-org.com>, <https://github.com/mlr-org/mlr3mbo>.
- ROBERTS, D. R.; BAHN, V.; CIUTI, S.; BOYCE, M. S.; ELITH, J.; GUILLERA-ARROITA, G.; ... DORMANN, C. F.; 2017. Cross-validation strategies for data with temporal, spatial, hierarchical, or phylogenetic structure. *Ecography*, 40(8), 913–929. doi:10.1111/ecog.02881
- ROCES-DÍAZ, J. V.; VAYREDA, J.; DE CÁCERES, M.; GARCÍA-VALDÉS, R.; BANQUÉ-CASANOVAS, M.; MORÁN-ORDÓÑEZ, A.; ... MARTÍNEZ-VILALTA, J.; 2021. Temporal changes in Mediterranean forest ecosystem services are driven by stand development, rather than by climate-related disturbances. *Forest Ecology and Management*, 480, 118623. doi:10.1016/j.foreco.2020.118623
- SANTONJA, M.; FERNANDEZ, C.; PROFFIT, M.; GERS, C.; GAUQUELIN, T.; REITER, I. M.; CRAMER, W.; BALDY, V.; 2017. Plant litter mixture partly mitigates the negative effects of extended drought on soil communities and litter decomposition in a Mediterranean oak forest. *Journal of Ecology*, 105, 801–815. doi:10.1111/1365-2745.12711
- SHAH, F.; NICOLÁS, C.; BENTZER, J.; ELLSTRÖM, M.; SMITS, M.; RINEAU, F.; CANBÄCK, B.; ...; TUNLID, A.; 2016, Ectomycorrhizal fungi decompose soil organic matter using oxidative mechanisms adapted from saprotrophic ancestors. *New Phytol*, 209: 1705-1719. <https://doi.org/10.1111/nph.13722>
- STEIDINGER, B. S.; BHATNAGAR, J. M.; VILGALYS, R.; TAYLOR, J. W.; QIN, C.; ZHU, K.; ... PEAY, K. G.; 2020. Ectomycorrhizal fungal diversity predicted to substantially decline due to climate changes in North American Pinaceae forests. *Journal of Biogeography*. doi:10.1111/jbi.13802
- STEIDINGER, B. S.; CROWTHER, T. W.; LIANG, J.; VAN NULAND, M. E.; WERNER, G. D. A.; ... PEAY, K. G.; 2019. Climatic controls of decomposition drive the global biogeography of forest-tree symbioses. *Nature*, 569(7756), 404–408. doi:10.1038/s41586-019-1128-0
- TERRER, C.; VICCA, S.; HUNGATE, B. A.; PHILLIPS, R. P.; & PRENTICE, I. C.; 2016. Mycorrhizal association as a primary control of the CO₂ fertilization effect. *Science*, 353(6294), 72–74. doi:10.1126/science.aaf4610

Tabla 1. Selección las parejas de Modelos de Circulación Global (GCM) y Modelos Climáticos Regionales (RCM) y sus correspondientes tendencias climáticas generales. Las tendencias climáticas se estimaron en el otoño (agosto a diciembre) entre 2020 y 2100 y bajo dos escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero (RCP), a saber, RCP 4.5 y RCP 8.5. "Prec" corresponde a la tendencia anual de la precipitación (mm-año^{-1}) y "MaxT" la tendencia de la temperatura máxima de otoño ($^{\circ}\text{C-año}^{-1}$). La significación estadística (*) se calculó a partir del test de Mann-Kendall y el valor de la misma a partir de la aproximación de Theil-Sen.

GCM	RCM	RCP	Prec	MaxT
MPI-M-MPI-ESM-LR	RCA4	RCP 4.5	0.135	0.024*
		RCP 8.5	-0.251	0.053*
MPI-M-MPI-ESM-LR	REMO2009 (run1)	RCP 4.5	-0.492	0.023*
		RCP 8.5	-0.676	0.058*
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	RCA4	RCP 4.5	0.322	0.016*
		RCP 8.5	-0.350	0.053*
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	CCLM4-8-17	RCP 4.5	0.594	0.018*
		RCP 8.5	-0.510	0.053*

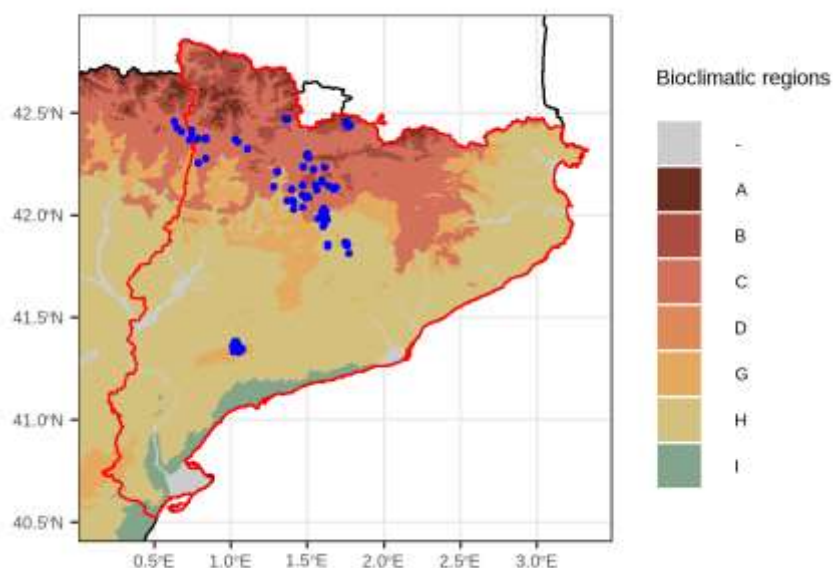


Figura 1. Regiones bioclimáticas y parcelas de muestreo (puntos azules) del área de estudio (borde rojo). Regiones: A – alpina, B – subalpina, C – montana, D – montaña baja, G – supramediterránea, H – mesomediterránea, I – termomediterránea. Las regiones grises (“-”) no tienen ninguna asignación como región bioclimática.

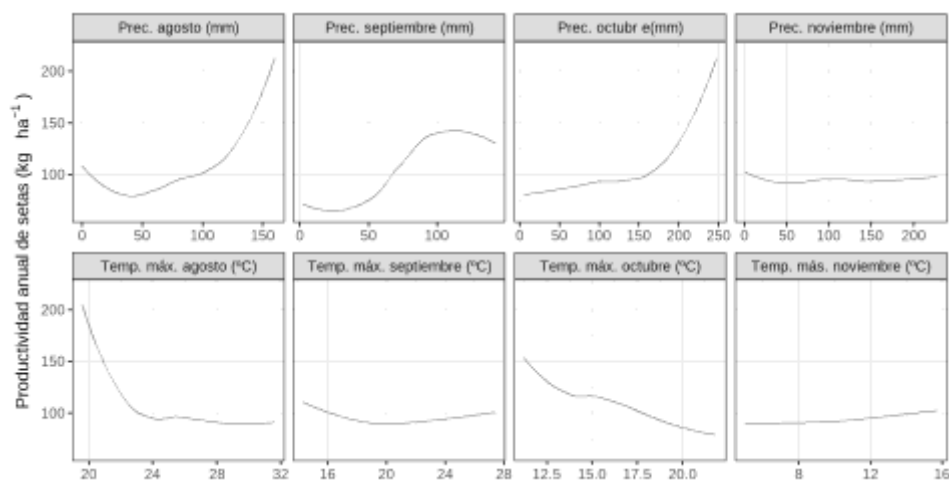


Figura 2. Dependencias parciales entre los predictores del modelo random forest (precipitación acumulada mensual "Prec" y temperatura media máxima mensual "Temp. máx.") y la productividad anual de setas (kg ha^{-1}).

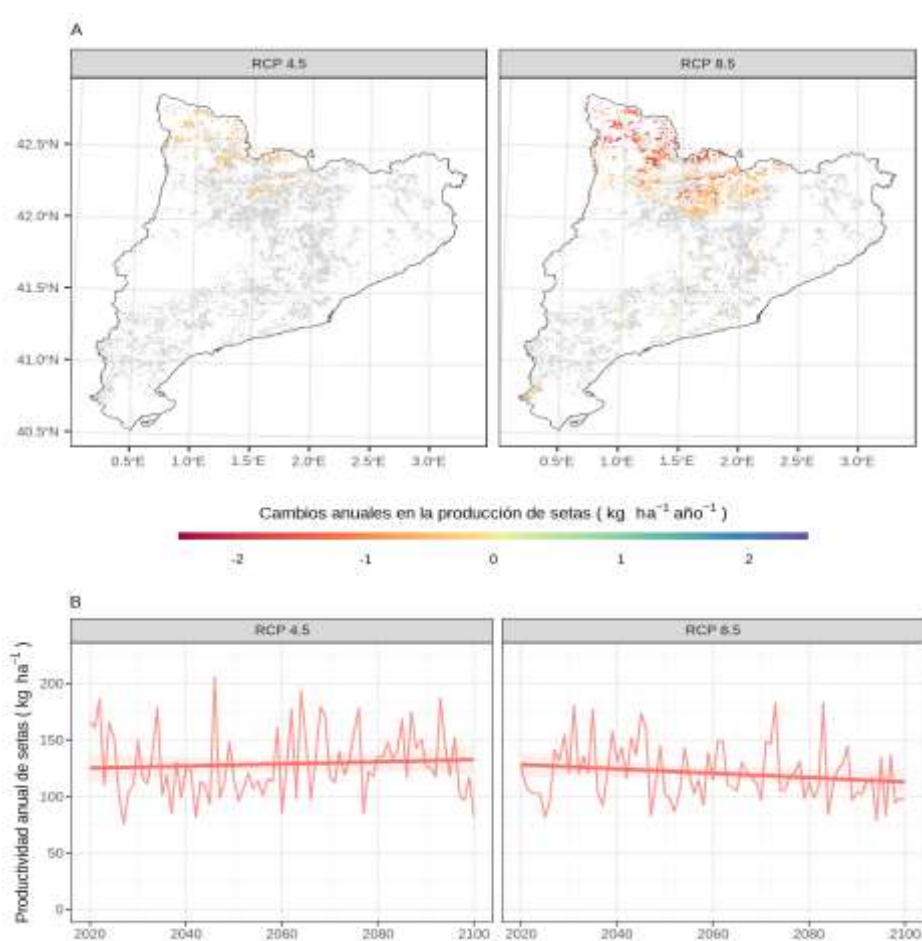


Figura 3. Cambios futuros (2020-2100) en la productividad de setas.; A) Cambios espacialmente explícitos a través del área de estudio. Las zonas grises corresponden a zonas sin cambios estadísticamente significativos.; B) Evolución anual de la productividad de setas en el conjunto del área de estudio. Las líneas rectas representan la tendencia lineal con su intervalo de confianza (área sombreada).